

УДК 621.436.001.24

Ю.О. Анімов, канд. техн. наук

## РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПОЛІПШЕННЯ ТЯГОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКО-ФОРСОВАНОГО ДВОТАКТНОГО ТРАНСПОРТНОГО ДВИГУНА

Поліпшення тягових якостей транспортного дизеля, що характеризується коефіцієнтом пристосованості ( $K_m$ ) і діапазоном робочих частот обертання колінчастого вала ( $K_n$ ), є однією з важливих проблем дизелебудування. Особливо це стосується високооборотних і високофорсованих двотактних турбопоршневих двигунів 5ТДФ, 6ТД, 3ТД і різних їх модифікацій, що використовуються у наземних транспортних машинах спеціального призначення.

Загальним для цих двигунів є застосування механічного приводу агрегатів турбонаддуву, при якому відцентровий компресор і осьова турбіна, які розміщені по різних торцях блоку циліндрів і з'єднані між собою ресорним приводом, з'єднані також через механічну передачу у вигляді підвищувального шестеренного редуктора з колінчастими валами двигуна. Для стислості таку схему наддуву надалі будемо називати умовно механічним турбонаддувом.

Такий наддув, необхідний для забезпечення примусової продувки і наповнення циліндрів свіжим зарядом, додає двигуну такі прогресивні характеристики, як підвищення приємності, збільшення гальмової потужності, поліпшення якості робочого процесу й екологічних показників на перехідних режимах, а транспортній машині - високі динамічні якос-

ті, підвищення маневреності. Але поряд з цим, через різке зниження тиску наддуву і, відповідно, витрати повітря, зі зменшенням частоти обертання колінчастого вала механічний турбонаддув обмежує діапазон робочих частот обертання двигуна і його пристосованість.

Це обмеження обумовлене підвищенням теплонапруженості деталей циліндро-поршневої групи, зокрема складеного поршня двигунів типу ТД, корпус якого виготовляється з алюмінієвого сплаву АК4-1, і також термічною міцністю елементів газопускного тракту - колекторів і турбіни. Тому в зазначених двотактних транспортних двигунах коефіцієнт пристосованості не перевищує 1,17...1,2, а діапазон робочих частот обертання - 1,37.

На рис. 1 приведені значення критерію А.К. Костіна, що побічно характеризує теплонапруженість поршня, визначені за результатами експериментальних досліджень високофорсованого двотактного транспортного двигуна 6ТД-2, який працює з  $K_m=1,19$  та  $K_n=1,37$ . Видно, що на всіх режимах зовнішньої характеристики критерій теплонапруженості поршня дорівнює 10...11. Ця величина  $q_n$ , як підтвердив досвід експлуатації зазначеного двигуна, ще забезпечує необхідний ресурс його роботи.

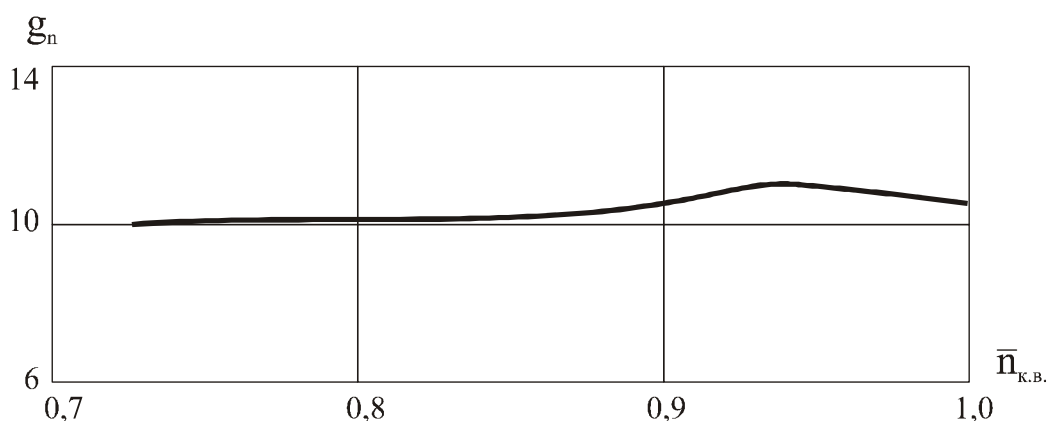


Рис. 1. Зміна критерію теплонапруженості поршня  $q_n$  по зовнішній характеристиці двигуна 6ТД-2

Використовуючи критерій А.К. Костіна, можна проаналізувати можливі шляхи підвищення  $K_m$  та  $K_n$  без збільшення теплонапруженості поршня. Згідно [1] цей критерій теплонапруженості записується у вигляді:

$$q_n = b \cdot C_m^{0,5} \left( \frac{D}{P_K} \right)^{0,38} \cdot (P_e g_e 10^{-3} \frac{T_K}{T_0})^{0,88}, \quad (1)$$

де  $b$  - коефіцієнт, що дорівнює для двотактних

двигунів 10,202;

$P_K$  та  $T_K$  - тиск повітря в МПа і температура в К перед впускними вікнами циліндра;

$C_m$  - середня швидкість поршня, м/с;

$D$  - діаметр циліндра, м;

$P_e$  - середній ефективний тиск, МПа;

$g_e$  - питома витрата палива, г/кВт·год;

$T_0$  - температура повітря при нормальних умовах ( $T_0 = 293K$ ).

Коефіцієнт пристосованості двигуна дорівнює:

$$K_m = \frac{N_{eM} \cdot n_H}{N_{eH} \cdot n_M}, \quad (2)$$

де індексами "H" та "M" позначаються параметри відповідно режимів номінальної потужності і максимального крутного моменту.

Ефективна потужність двигуна на режимі  $M_{кр\ max}$  дорівнює [2]:

$$N_{eM} = k \cdot j \cdot \frac{V_h \cdot \gamma_{KM} \eta_{vM}}{\alpha_M} n_M \cdot \eta_{eM}, \quad (3)$$

де  $K=0,02448$ , а  $j=2$  - коефіцієнт частоти циклів;

$V_h$  - робочий об'єм циліндрів, л;

$\gamma_K$  - щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$\eta_v$  - коефіцієнт наповнення;

$\eta_e$  - ефективний ККД двигуна;

$\alpha$  - коефіцієнт надлишку повітря;

$n$  - частота обертання, хв.<sup>-1</sup>.

Щільність повітря дорівнює:

$$\gamma_{KM} = \frac{9,81 \cdot 10^5 P_{KM}}{RT_{KM}},$$

де  $P_K$  - тиск у повітряному ресивері, МПа.

Отже,

$$N_{eM} = 1,668 \cdot 10^2 \cdot \frac{V_h}{T_{KM}} \cdot \frac{P_{KM} \eta_{vM}}{\alpha_M} n_M \cdot \eta_{eM}. \quad (4)$$

Виразимо  $\frac{P_{KM} \eta_{vM}}{\alpha_M}$  через критерій теплонапруженості, для цього середній ефективний тиск у формулі (1) запишемо, як

$$P_{eM} = \frac{62,38 \cdot N_{eM}}{V_h \cdot n_M} \quad (\text{МПа}). \quad (5)$$

З оглядом на (4) формула (5) прийме вигляд

$$P_{eM} = \frac{10,405 \cdot 10^3}{T_{KM}} \cdot \frac{P_{KM} \cdot \eta_{vM}}{\alpha_M} \cdot \eta_{eM}.$$

Останній співмножник у дужках у критерії А.К. Костіна буде дорівнювати:

$$P_{eM} \cdot g_{eM} \cdot 10^{-3} \frac{T_{KM}}{293} = 0,0355 \frac{P_{KM} \cdot \eta_{vM}}{\alpha_M} \cdot g_{eM} \eta_{eM}.$$

При теплотворній здатності дизельного палива  $H_u=42947,5$  кДж/кг добуток  $g_{eM} \times \eta_{eM}$  дорівнює 83,85 г/кВт·год [2].

Отже,

$$P_{eM} \cdot g_{eM} \cdot 10^{-3} \frac{T_{KM}}{293} = 2,976 \frac{P_{KM} \cdot \eta_{vM}}{\alpha_M}.$$

Таким чином, з (1) випливає, що

$$\frac{P_{KM} \cdot \eta_{vM}}{\alpha_M} = 0,2896 \left[ \frac{q_{nM}}{b \cdot C_{mM}^{0,5} \left( \frac{D}{P_{KM}} \right)^{0,38}} \right]^{1,13636}. \quad (6)$$

Підставивши (6) у (4), одержимо:

$$N_{eM} = 48,3 \cdot V_h \frac{n_M \cdot \eta_{eM}}{T_{KM}} \cdot \left[ \frac{q_{nM}}{b \cdot C_{mM}^{0,5} \left( \frac{D}{P_{KM}} \right)^{0,38}} \right]^{1,13636}. \quad (7)$$

а коефіцієнт пристосованості буде дорівнювати:

$$K_m = 48,3 \cdot \frac{n_H}{N_{eM}} \cdot V_h \frac{\eta_{eM}}{T_{KM}} \cdot \left[ \frac{q_{nM}}{b \cdot C_{mM}^{0,5} \left( \frac{D}{P_{KM}} \right)^{0,38}} \right]^{1,13636}. \quad (8)$$

При незмінних  $n_H$ ,  $N_{eM}$  і  $q_{nM}$  збільшення  $K_m$  щодо якогось вихідного значення, що позначається індексом "0", дорівнює:

$$\bar{K}_m = \frac{K_m}{K_{m0}} \cdot \frac{\eta_{eM}}{\eta_{e0}} \cdot \left[ \frac{(\bar{P}_{KM})^{0,38}}{(\bar{n}_M)^{0,5}} \right]^{1,13636}. \quad (9)$$

Відносна зміна деяких параметрів, що входять у рівняння (9), можна записати в такий спосіб:

$$\bar{T}_{KM} = \frac{T_{KM}}{T_{KM0}} = \frac{1 + \frac{\pi_{KM}^{\frac{K-1}{K}} - 1}{\eta_K}}{1 + \frac{\pi_{K0}^{\frac{K-1}{K}} - 1}{\eta_{K0}}},$$

де  $\pi_K$  та  $\eta_K$  - відповідно ступінь підвищення тиску повітря в компресорі і ККД компресора.

Вважаючи незначним відмінність  $\eta_K$  від  $\eta_{K0}$ , відносна зміна  $T_{KM}$  буде дорівнювати:

$$\bar{T}_{KM} = \frac{\pi_{KM}^{\frac{K-1}{K}} - 1 + \eta_{K0}}{\pi_{K0}^{\frac{K-1}{K}} - 1 + \eta_{K0}}.$$

Відносну зміну тиску наддувочного повітря можна записати, як:

$$\bar{P}_{KM} = \frac{P_{KM}}{P_{KM0}} = \frac{\pi_{KM} \cdot P_{aM}}{\pi_{KM0} \cdot P_{aM0}},$$

де  $P_a$  - тиск повітря на вході в компресор.

При малому опорі повітро-підвідної системи чи при відносно невеликій зміні  $\pi_{KM}$  можна вважати, що

$$\bar{P}_{KM} \approx \pi_{KM}.$$

Таким чином, відносна збільшення коефіцієнту пристосованості двигуна можна описати рівнянням

$$\bar{K}_m = \frac{\eta_{eM} (\pi_{KM}^{\frac{K-1}{K}} - 1 + \eta_{K0})}{\pi_{K0}^{\frac{K-1}{K}} - 1 + \eta_{K0}} \cdot (\bar{P}_{KM})^{0,4318} \cdot (\bar{K}_n)^{0,5682}. \quad (10)$$

Розглянемо, як впливає на  $\bar{K}_m$  зміна  $\pi_{KM}$  і  $K_n$ , вважаючи незмінною величину  $\eta_{eM}$ . Прийнемо

$\eta_{k_0}=0,8$ , тому що у згаданих раніше двотактних транспортних двигунів ККД їхніх компресорів на режимі  $M_{кр\ max}$  звичайно дорівнює  $0,80\dots0,82$ .

На рис. 2 графічно зображені залежності  $\bar{K}_m = f(\bar{K}_n, \bar{\pi}_{K_M})$  при незмінній величині критерію теплонапруженості поршня. Слід зазначити, що розрахунки по формулі (10) показують вкрай малу відмінність у величині  $\bar{K}_m$  при фіксованих значеннях  $\bar{\pi}_{K_M}$  і  $K_n$  для  $\bar{\pi}_{K_M}=1,5$ ;  $2,0$  та  $2,5$ . Тому на рисунку представлені дані тільки для  $\bar{\pi}_{K_M}=2,5$ .

З розгляду цих залежностей видно, якими способами можна підвищити пристосовність двигуна, не збільшуючи теплонапруженість його поршня. Так, збільшити  $K_m$  можна за рахунок збільшення тиску наддувочного повітря, однак ефект від збільшення  $P_{K_M}$  без проміжного охолодження повітря невеликий.

Це пояснюється тим, що при збільшенні  $P_{K_M}$  хоча і збільшується витрата наддувочного повітря, але одночасно росте його температура  $T_{K_M}$ .

Найбільший ефект по збільшенню  $K_m$  досягається при збільшенні діапазону частот обертання двигуна. На рис. 2 пунктирною лінією зображено, як змінювався б  $K_m$  для двигуна 6ТД-2 при вище обговорених умовах. Видно, що при збільшенні  $K_m$  на 40% величина  $K_m$  могла б бути збільшена не менш, ніж на 16%. Однак у дійсності це не може бути здійснене через появу іншого обмеження при збільшенні  $K_m$  вище існуючого значення.

Це обумовлено тим, що через різке зниження  $\bar{\pi}_{K_M}$  зменшується витрата повітря через циліндри двигуна, тому що останній оснащений механічним турбонаддувом. Зменшення витрати повітря приводить до істотного підвищення температури відпрацьованих газів.

Тому обмеженням починає виступати термічна міцність турбіни. У двигунів типу ТД турбіна працює при температурі відпрацьованих газів на вході ( $1023\dots1073$ ) К. З огляду на високі динамічні навантаження, що діють на турбіну при експлуатації двигуна в об'єкті, подальше збільшення температури газу супроводжується зниженням надійності її основних вузлів і деталей.

Тому відповідно до графіків, рис. 2, раціональним напрямком збільшення коефіцієнта пристосовності двигуна є збільшення  $K_n$  при збереженні постійним тиску наддувочного повітря,  $\bar{\pi}_{K_M}=1,0$ . Виконання  $\bar{\pi}_{K_M}>1,0$  небажане за двома причинами: по-перше, воно, як уже відзначалося вище, незначно впливає на величину  $K_m$  (збільшення  $\bar{\pi}_{K_M}$  на 20% дозволяє збільшити  $K_m$  усього на 3%) і, по-друге, саме головне, обумовлює значний ріст максимально-

го тиску згоряння, що негативно позначається на надійності роботи циліндро-поршневої групи.

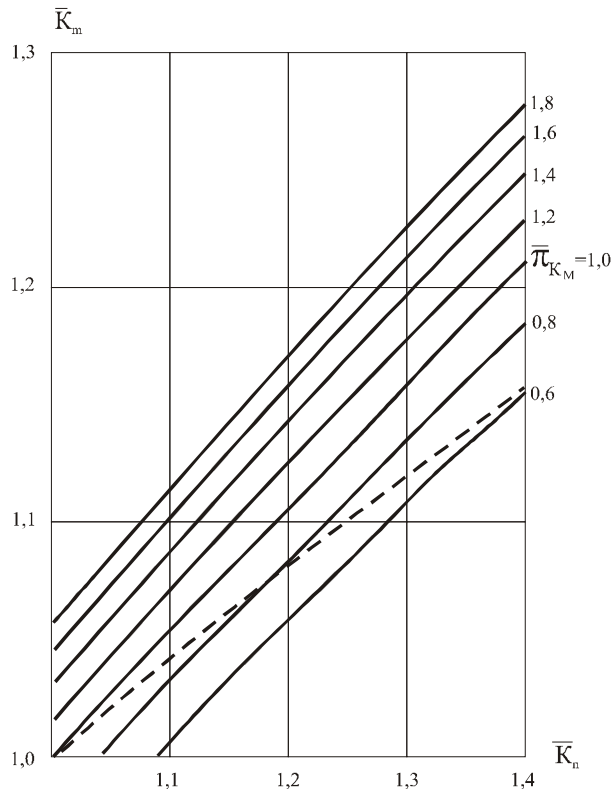


Рис. 2. Зміна коефіцієнта пристосовності двотактного транспортного двигуна в залежності від  $\bar{\pi}_{K_M}$  і  $\bar{K}_n$  при  $\bar{\eta}_{eM}=1,0$  і  $\bar{q}_{nM}=1,0$  (----- умовно для двигуна 6ТД-2 з механічним турбонаддувом)

Очевидно, що для виконання умови  $\bar{\pi}_{K_M}=1,0$  при збільшенні  $K_n$  необхідно вводити регулювання тиску наддуву.

При збільшенні  $K_n$  наприклад, на 30% виконання умови  $\bar{\pi}_{K_M}=1,0$  рівносильне збільшенню  $\pi_K$  в компресорі двигуна 6ТД-2 з механічним турбонаддувом на 40%. Таку зміну  $\pi_K$  у компресорі неможливо здійснити застосуванням аеродинамічних способів керування (наприклад, зміною закручення потоку повітря на вході в колесо). На рис. 3 зображена зміна вихідних параметрів двигуна 6ТД-2 по зовнішній характеристиці при роботі його з механічним турбонаддувом і з диференціальним приводом компресора. Чітко видно, що диференціальний привод компресора дозволяє істотно поліпшити тягову характеристику двигуна при значному поліпшенні паливної економічності в області  $K_n$  до 1,55.

Передаточне відношення диференціального привода компресора змінюється таким чином, що тиск наддувочного повітря на режимі  $M_{кр\ max}$  при  $K_n=1,75$  залишається практично таким же, як і при вихідному механічному турбонаддуві, при  $K_n=1,37$ .

Завдяки цьому при незмінній температурі відпрацьованих газів за турбіною вдалося підвищити коефіцієнт пристосованості двигуна з 1,19 до 1,36.

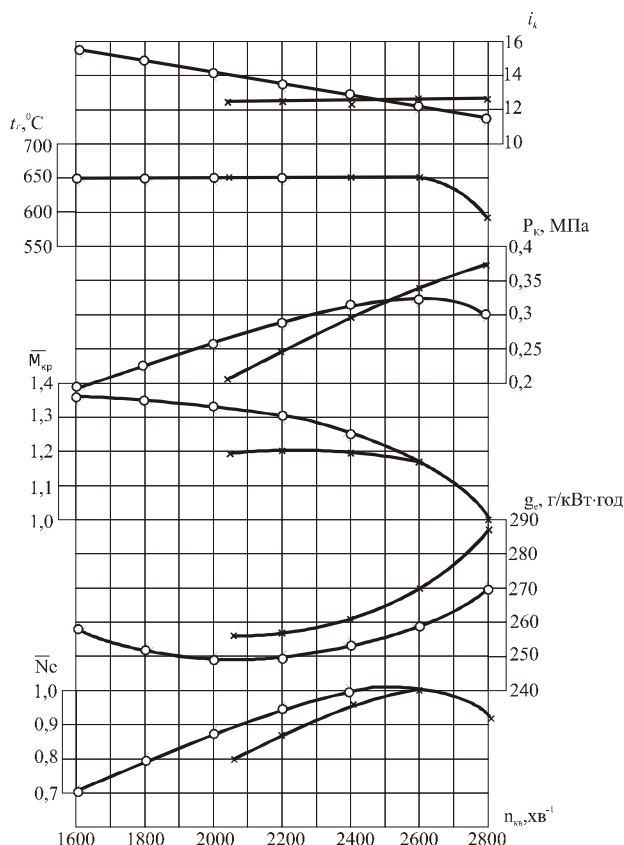


Рис. 3. Зовнішня характеристика двигуна 6ТД-2 в об'єктових умовах:  $\bigcirc$ — $\bigcirc$  з механічним турбонаддувом;  $\times$ — $\times$  з диференціальним приводом компресора, ( $i_k$  - передатне відношення привода компресора;  $t_r$  - температура газу на виході з турбіни)

З розрахункових графіків, рис. 2, видно, що підвищення  $K_n$  з 1,37 до 1,75, тобто на 28%, при  $\bar{\pi}_{\kappa\mu} = 1,0$  приводить до росту  $K_m$  на 15%, що практично співпадає з експериментальними значеннями.

Схему такого диференціального привода компресора описано в роботі [4]. Виконавчим органом зміни передатного відношення диференціала є безпосередньо турбіна, при зміні потужності і частоти обертання якої змінюється частота обертання ротора компресора.

Незначна відмінність експериментального значення  $K_m$  від розрахункового обумовлена, мабуть, трохи меншим ( $\sim$  на 1%) ефективним ККД двигуна з диференціальним приводом компресора на режимі  $M_{кр\ max}$ . Це можна пояснити тим, що із зменшенням

частоти обертання колінчастого вала хоча і зменшуються механічні втрати на тертя, але одночасно через необхідне збільшення циклової подачі палива зменшується коефіцієнт надлишку повітря  $i$ , відповідно, зменшується індикаторний ККД двигуна. Безперечно, зменшення індикаторного ККД превалює над збільшенням механічного ККД двигуна.

Таким чином, зіставлення експериментальних і розрахункових даних показує їхню добру збіжність, що свідчить про застосовність розробленого методу для рішення інженерних задач.

Необхідно відзначити, що застосування безхідчастої зміни частоти обертання ротора компресора, реалізоване в його диференціальному приводі, дозволяє не тільки поліпшити тягову характеристику двигуна (підвищується  $K_m$  і  $K_n$ ) але і, як повідомляється в роботі [3], внаслідок зменшення незатребуваних витрат потужності на стиснення повітря в компресорі, значно поліпшити паливну економічність двигуна при часткових навантаженнях, що позитивно відіб'ється на зниженні шляхової експлуатаційної витрати палива.

Отже, підводячи підсумок вищесказаному, можна зробити наступний висновок. Експериментальними дослідженнями підтверджено вірогідність результатів розробленого методу розрахункового аналізу і вибору напрямку по поліпшенню тягових характеристик високофорсованих двотактних транспортних двигунів. Такий метод дозволяє цілеспрямовано формувати характеристики двигунів, які розробляються знову і модернізуються, що в значній мірі скоротить трудомісткість і тривалість їхнього доведення.

#### Список літератури:

1. Дизели: Справочник Под общ. ред. В.А. Ваншейдта, Н.Н. Иванченко, Л.К. Коллерова., - Л: Машиностроение, 1977. - 480 с.
2. Портнов Д.А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия, - М.: Машигиз, 1963 - 640 с.
3. Совершенствование эксплуатационных характеристик транспортных 2-х тактных дизельных двигателей типа 6ДН за счет использования дифференциального привода компрессора наддувочного воздуха /Рязанцев Н.К., Краюшкин И.А., Алехин С.А., Перерва П.Я., Бородин Ю.С., Овчаров Е.Н. Вестник национального технического ун-та "ХПИ", - Сб научн. трудов, - Харьков, 2001. - Вып. I. - с. 131-135.
4. Рязанцев Н.К. Конструкция форсированных двигателей наземных транспортных машин: Учебное пособие - часть 2, - Харьков: ХГПУ, 1996. -388 с.